

文章编号 1674-2915(2009)06-0489-06

真空罐内应用的太阳模拟灯阵热设计

苏克强^{1,2}, 陈长征¹, 任建岳¹, 张 军¹, 李宪圣¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为了解决太阳模拟灯阵整体放在真空罐内使用时的导热问题,采用热管导热的方案,设计了专门的氙灯导热机构。计算了液氮系统的导热能力,结果显示,真空罐液氮冷却系统的温度升高 ΔT 为2.074 1 K,小于其过冷度4 K,表明真空罐液氮冷却系统完全可以将太阳模拟灯阵的热量导出。采用热管导热技术,设计了导热机构,用有限元分析法进行了热仿真分析,分析结果表明,氙灯阴阳极温度维持在100℃左右,氙灯灯泡维持在655℃左右,满足氙灯正常工作的温度条件;积分器和反射镜组件温度维持在200℃左右,椭球镜温度维持在135℃左右,亦满足正常工作的温度条件,从而验证了热设计的正确性。

关键词:太阳模拟灯阵;仿真分析;热设计;真空

中图分类号:TM923.323; V524.2 **文献标识码:**A

Thermal design of solar simulation xenon lamp array used in vacuum

SU Ke-qiang^{1,2}, CHEN Chang-zheng¹, REN Jian-yue¹, ZHANG Jun¹, LI Xian-sheng¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese
Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: In order to solve the problem of heat conduction of a solar simulation xenon lamp array used in a vacuum tank, a special heat conduction mechanism for xenon lamps is designed by using a heat pipe technology. The heat conduction ability of the cooling system is calculated, and the results indicate that the temperature change ΔT of liquid nitrogen cooling system is 2.074 1 K, lower than a super cooling temperature of 4 K, which points out that the liquid nitrogen cooling system can export the heat of solar simulation xenon lamp array out from the vacuum tank. A heat conduction mechanism is designed, and the finite element analysis is

收稿日期:2009-06-15;修订日期:2009-09-23

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(863-2-5-1-13B)

used to carry out thermal simulation analysis. The thermal simulation analysis results show that the temperatures for the anode and cathode of xenon lamp and the bulb of xenon lamp are about 100 °C and 655 °C, respectively. Moreover, the temperatures of an optical integrator and mirror are both about 200 °C and the temperature of an ellipsoidal mirror is about 135 °C, which meets the normal working conditions for a long period. The results obtained prove that the thermal design is feasible and reasonable.

Key words: solar simulation Xe flash-lamp array; simulation analysis; thermal design; vacuum

1 引言

太阳模拟装置是航天技术中空间环境模拟设备的主要组成部分,用于在航天器热平衡试验中模拟太阳光照射,提供与太阳光谱分布相匹配的、均匀稳定的光辐照,与其它外热流模拟设备共同为航天器模拟空间的外热流环境,以检验航天器热设计^[1]的合理与否。传统的太阳模拟器由于功率大、结构复杂且均将太阳模拟器光源放在真空罐外而准直镜系统放在罐内^[2~5],通过真空密封窗口辐照罐内试验件时,不仅罐内辐照面积受限、光能利用效率低,而且操作不灵活;而利用红外模拟技术,在光谱分布上与真实的太阳光又存在较大的差距,因此,人们采用太阳模拟灯阵的方法来解决上述问题。本文论述的真空罐内太阳模拟灯阵由4个太阳模拟灯组成,每个太阳模拟灯光源均为2.5 kW 氙灯,用于某航天遥感器的热平衡试验时,可以整体放在真空罐内,操作灵活,同时氙灯的光谱分布与太阳光非常接近。

传统的太阳模拟器多采用风冷或水冷技术进行散热,但在真空环境中无法进行风冷,只能采用传导和辐射方式散热,因此,如何将氙灯的热量导出真空罐外成为真空罐内太阳模拟灯阵研制成败的关键。

通常热传递有热传导、热辐射、热对流等3种方式。对真空应用太阳模拟灯阵而言,由于太阳模拟灯阵整体置于真空罐内,没有热对流,故热传导和热辐射方式起主要的作用,因此真空罐内太阳模拟灯阵的热分析主要考虑热量以热传导和热辐射方式传递时的散热效果。

2 热设计的理论计算

由于太阳模拟灯阵置于 ZM-4300 真空罐内使用,如果为太阳模拟灯阵单独设计冷却系统,会破坏真空罐的机械结构,而太阳模拟灯阵结构也会很复杂,因此,利用真空罐自身的冷却系统将热量导出是一个较好的方法。导热流程如图1所示,太阳模拟灯阵通过导热机构将热量传导给真空罐热沉,该热沉通过液氮冷却系统将热量带到真空罐外。整个导热流程有两个关键点,一是导热机构的导热能力,二是液氮冷却系统的导热能力。

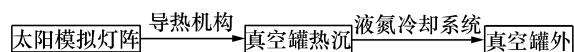


图1 导热流程图

Fig. 1 Flowchart of heat conduction

首先计算液氮冷却系统的导热能力,即计算真空罐液氮冷却系统能否将太阳模拟灯阵的热量导出。ZM-4300 真空罐液氮循环量 $G = 15 \text{ m}^3/\text{h}$, 所有液氮泵都打开时,真空罐液氮冷却系统温升如下:

$$\Delta T = \frac{Q}{GC_p\rho} = 2.074 \text{ K}, \quad (1)$$

式中,液氮循环量 $G = 15 \text{ m}^3/\text{h} = \frac{1}{240} \text{ m}^3/\text{s}$; 总的热负荷 $Q = 14 \text{ kW}$; 温度处于 84 ~ 88 K 时,液氮比热容 $C_p = 2.093 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 液氮密度 $\rho = 774 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

计算表明,ZM-4300真空罐液氮冷却系统的

过冷度 $> 4 \text{ K} > \Delta T$, 完全可以将太阳模拟灯阵的热负荷通过热沉导出去。

3 热设计的方案选择

真空罐内应用的太阳模拟灯阵的热设计就是根据所散热能的大小、太阳模拟灯阵机械结构、所使用的材料,以及氙灯灯级的封装形式,采用各种热控制措施来组织太阳模拟灯内部和外部的热交换过程,保证太阳模拟灯阵在整个运行期间各组件的温度水平以及温度分布都保持在规定的范围之内,并且满足高可靠性和精度等要求。

由于太阳模拟灯阵置于真空罐内使用,无法实施风冷,而水冷结构又过于复杂,为了能提出合理的热设计方案,本文对太阳模拟灯各组件的热能分布量进行了统计。如表1所示,热能主要集中在氙灯的阴阳两极,尤其是阳极,占了总热能的73%,而反射镜组件、积分器组件、椭球镜分布的热能很少。试验表明,在太阳模拟灯长时间工作情况下,反射镜组件、积分器组件、椭球镜的温度仅靠辐射散热即可满足使用要求,故只需为氙灯阴阳极设计专门的导热机构。导热机构需要高的导热率,因此本文采用了热管导热方式。

表1 各组件热能分布

Tab.1 Energy distribution of components

组件名称	热能分布量(W)
氙灯阳极	1 420
氙灯阴极	375
反射镜组件	46
积分器组件	30
椭球镜	80
总热能	1951

热管技术是一种高效率的热传导技术^[6], 1963年由美国的 LosAlamos 国家实验室的 G. M. Grover 发明。热管属于一种传热元件,它充分利用了热传导原理与致冷介质的快速热传递性质,通过在全封闭真空管内的液体的蒸发与凝结来传递热量,具有极高的导热性、良好的等温性、冷热两侧的传热面积可任意改变、可远距离传热、可控制温度以及热开关性能等一系列优点,并且由热

管组成的换热器具有传热效率高、结构紧凑、流体阻损小等优点^[7]。其导热能力已远远超过任何已知金属的导热能力,单位质量热管的传热能力比普通金属高几个数量级,特别适用于高精密以及真空散热环境。 $\phi 10 \text{ mm}$ 沟槽式热管每根热管的导热功率标准为 55 W , 在 $160 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右高达 80 W , 热管导热性如图2所示。本文采取阳极24根热管、阴极8根热管的导热方案。值得注意的是,热管只是一种高效率的热传导技术,本身并不能散热,还必须要要在冷凝端配合散热装置例如盘有液氮管的冷屏、热沉等才能把热量最终散发出去。热管使用的最低温度为 $-70 \text{ }^\circ\text{C}$, 这与热管内注入的工质有关,因此为了增大热管使用的温度范围,需要更换工质。另外也可以通过在冷屏、热沉与热管之间加一块紫铜板在热管与冷屏、热沉形成温度梯度,使热管温度维持在正常工作的温度范围内。

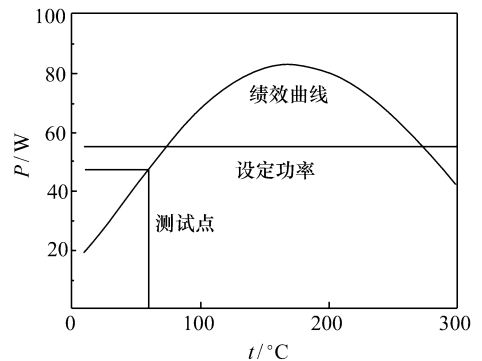


图2 热管导热性能

Fig.2 Heat conduction performance of heat pipe

4 氙灯导热结构设计与分析

每个太阳模拟灯的氙灯导热机构都是一样的,只是由于阴阳极的热能分布不同使得应用的热管数量不同。导热机构包括支撑板、热管、支撑衬套、支撑座、绝缘垫和盖板等,如图3所示。通常氙灯的发光效率为30%左右,大部分电能转化为热能,集中在阴极和阳极,其中更多的集中在阳极,阴极和阳极把热量传导给支撑衬套,再由支撑衬套通过热管传导给氮化硼绝缘垫,氮化硼绝缘垫通过热管将热量直接传导给真空罐内的热沉。

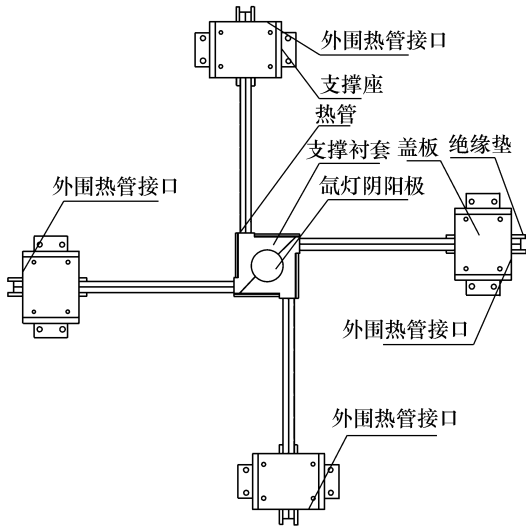


图3 氙灯导热机构

Fig. 3 Heat conduction mechanism of xenon lamp

其中热管的数量与氙灯的功率和热管的导热效率有关,支撑衬套采用 45° 方向两体式,用4个M3的螺钉将衬套和灯极压紧,使之接触紧密,热管与支撑衬套的连接采用紫铜盖板用4个M3螺钉压紧,由于氮化硼绝缘性、导热性都很好,内圈热管与外围热管之间采用氮化硼绝缘垫进行绝缘导热,并用铝制的支撑座加以固定,热管与铝支撑座之间用聚四氟乙烯绝缘垫绝缘,外围热管直接与真空罐热沉连接。

在真空罐内,由于固体表面粗糙,两壁面之间只有接触的地方才直接导热,在不接触处存在缝隙,热量是通过辐射的方式传递的,因而存在传热阻力,称为接触热阻。接触热阻的存在会影响热量的传递,所以在导热机构的两固体表面之间加较软的导热衬垫来弥补这个间隙,导热衬垫的导热系数一般在 $0.5 \sim 5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右,可以加强两固体之间的传导散热。导热衬垫的目的仅仅是为了弥补间隙,减小孔隙接触热阻,但是导热衬垫的导热系数相对热管而言还是很低的。根据傅里叶定律,热阻与导热衬垫的厚度成反比,所以导热衬垫越薄越好。导热衬垫的硬度和湿润度也很重要,越软、湿润度越高,越容易填补固体之间的间隙,接触热阻越小。

5 热设计仿真分析

热仿真分析工作可以对太阳模拟灯阵在真空罐内的真空工作环境进行一定程度的预测,并在一定程度上指导热设计工作的方向。该方法不仅可以缩短设计周期,还可以大大节约研制费用。由于4个太阳模拟灯的导热机构是完全一样的,因此对单个太阳模拟灯进行热分析完全可以反映整个灯阵的导热情况,并且减少了节点单元数量、缩短了计算时间。采取如前所述的热设计方案后,将热传导路径中各热管以及真空辐射等转化成相应的边界条件和约束,代入到热分析模型中,利用热分析软件进行计算机仿真计算。根据所得结果修改热控制和热设计方案,之后再对热模型进行CAE分析,修正热模型,经过若干次的改进设计,可以对各组件进行有效的热控制。再将其规定在温度极限内工作,可以提高太阳模拟灯阵工作的可靠性。

采用TMG软件建立了科学合理的有限元热模型进行热分析,有限元模型中一共建立了21个热耦合,划分了3 672个单元,4 476个节点。太阳模拟灯的热分析模型如图4所示。

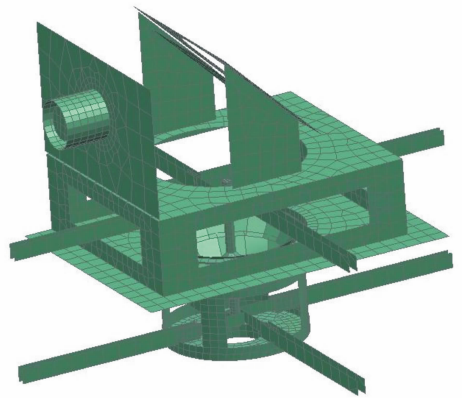


图4 太阳模拟灯的热分析模型

Fig. 4 Thermal analysis model of solar simulation xenon lamp

经稳态计算得到太阳模拟灯阵组件的各节点温度。主要分析计算参量见表2,热分析结果如图5所示,各组件温度统计见表3。

表2 主要计算参量

Tab.2 Main calculation parameters

材料名称	密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	比热容 $c(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	导热系数 $\lambda(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	太阳吸收率 α_s	太阳发射率 ε_n
氮化硼	2.25	600	30	0.9	0.9
紫铜	8.9	377	386.4	0.9	0.9
聚四氟乙烯	2.2	1 000	0.27	0.9	0.9
热管	3.34	141.5	141 000	0.9	0.9
石英	2.3	788	1.3	0.94	0.94
钼	9.59	255	138	0.9	0.9

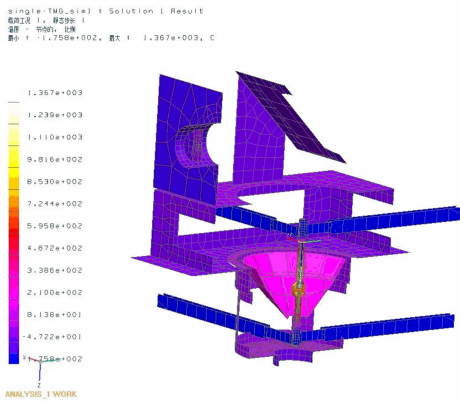


图5 温度分布云图

Fig.5 Nephogram of temperature distribution

表3 各组件温度统计

Tab.3 Temperature statistics of components

组件名称	温度/($^{\circ}\text{C}$)	允许的最高温度值/($^{\circ}\text{C}$)
氙灯阴极	92	400
氙灯阳极	102	400
氙灯灯泡	655	850
反射镜组件	205	300
积分器组件	196	300
椭球镜	135	200

从数据中可以看出,氙灯阴阳极温度在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,氙灯灯泡维持在 $655\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,均满足氙灯正常工作的温度条件。由于光源用 2.5 kW 氙灯,积分器和反射镜、椭球镜上的热负荷很小,用辐射散热即可使积分器和反射镜温度最高维持在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,椭球镜维持在 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,完全满足设计要求,达到了预期的设计目的。

6 结论

本文通过仿真设计,采用热管导热技术,完成了真空罐内用太阳模拟灯阵的热设计,解决了太阳模拟灯阵在真空罐内使用时的导热问题。计算结果表明,将太阳模拟灯阵整体置于真空罐内使用时,采用专门设计的氙灯导热机构能使氙灯阴阳极温度维持在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而氙灯灯泡维持温度在 $655\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,满足氙灯正常工作的温度条件;积分器和反射镜组件温度维持在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,满足正常工作条件。随着科学技术的进步,新导热材料、新导热工艺、新导热技术的研究和应用,这方面的研究工作一定能够获得新的成果。

参考文献:

[1] 王俊,黄本城,万才大,等. 环境模拟技术[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
WANG J, HUANG B CH, WAN C D, et al. . *Environment Simulation Technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996. (in Chinese)

[2] 杨林华,李兹松. 国外大型太阳模拟器研制技术概述[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(2): 162-167.
YANG L H, LI H S. The development of large solar simulators in the world [J]. *Spacecraft Environment Eng.*, 2009, 26(2): 162-67. (in Chinese)

[3] 向艳红,张容,黄本诚. KFTA 太阳模拟器灯单元的方案设计[J]. 航天器环境工程. 200522(2): 120-123.

- XIANG Y H, ZHANG R, HUANG B CH. Design of lamp module of KFTA solar simulator[J]. *Spacecraft Environment Eng.*, 2005, 22(2):120-123.
- [4] 庞贺伟, 黄本诚, 臧友竹, 等. KM6 太阳模拟器设计概述[J]. *航天器环境工程*, 2006, 23(3):125-133.
PANG H W, HUANG B CH, ZANG Y ZH, et al. . Design of KM6 solar simulator[J]. *Spacecraft Environment Eng.*, 2006, 23(3):125-133. (in Chinese)
- [5] 柯受全. 卫星环境工程和模拟试验[M]. 北京:中国宇航出版社, 1998.
KE SH Q. *Satellite Environment Engineering and Simulation Experiment* [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1998. (in Chinese)
- [6] 李永赞, 胡明辅, 李勇. 热管技术的研究进展及其工程应用[J]. *应用能源技术*, 2008, 6:45-48.
LI Y Z, HU M F, LI Y. Progress of theoretical research and application investigation on heat pipe technology and its application in engineering[J]. *Appl. Energy Technol.*, 2008, 6:45-48. (in Chinese)
- [7] 陈晒云. 浅谈热管技术的应用[J]. *贵州科技工程职业学院学报*, 2008, 3(1):35-37.
CHEN SH Y. Discussing easily the application of heat pipe technology[J]. *Guizhou Sci-tech Eng. Vocational College*, 2008, 3(1):35-37. (in Chinese)

作者简介: 苏克强(1983—), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事光学精密机械结构设计和热设计方面的研究。

E-mail: skq207@126.com